维普资讯 http://www.cqvip.com

第19卷第1期 同济大学学报 Vol. 19 № 1
1991年3月 JOURNAL OF TONGJI UNIVERSITY Mar. 1991

桩基竖向承载力的分项系数研究

高大钊 曾朱家

（地下建筑与工程系）

摘 要

桩基的竖向承载力由桩侧摩阻力和桩端阻力所组成。设置在分层土中的桩，其桩侧总摩阻力由桩所穿过的各土层的摩阻力所构成。在一般情况下，各土层的摩阻力不仅大小不同，而且变异性也各异。当采用极限状态设计原则，按分项系数设计表达式设计桩基础时，需要提供各土层设计参数的标准值及其分项系数。本文提出了一种基于试桩资料的统计方法，可以分别估计桩端阻力和分层土桩侧摩阻力的分项系数，其结果可作为编制规范的基础资料。

关键词：桩的承载力，分项系数。

一、桩基础的设计表达式

我国颁布的《建筑结构设计统一标准》依据以概率理论为基础的极限状态设计原则，采用以荷载标准值、材料性能标准值、几何参数标准值以及各种分项系数来描述的设计表达式。它作为制订各类结构规范以及地基基础规范时应遵守的准则，并据以作出各规范的具体规定。在地基基础的通用规范和各专门规范中，如何结合地基基础的特点，依据《统一标准》的原则，提出各项设计参数，这是有待解决的问题。

按现行规范采用总安全系数方法设计桩基，当承受中心荷载时，由分层参数计算单桩容许承载力 Q_j 的设计表达式为：

$$Q_j \leqslant \frac{1}{K}\left[q_p A_p + U\sum_{i=1}^{n} q_i l_i\right] \tag{1}$$

式中：q_p——端阻力；q_i——分层土桩侧摩阻力；A_p——桩的全截面面积；U——桩的周长；l_i——桩穿越的土层厚度；K——总安全系数。

采用分项系数方法设计桩基时，将总安全系数K分解为荷载和抗力两部分分项系数。桩头荷载Q由恒载和活载组成，两者的变异系数不相同，因此分别用不同的分项系数乘以相应的荷载标准值。由于桩所穿过的土层往往具有不相同的桩侧摩阻力统计参数，必须采用不同的分项系数。如有n个土层，则具有$n+3$个分项系数的设计表达式为：

$$\gamma_G Q_{GK} + \gamma_L Q_{LK} \leqslant \gamma_p q_{pK} A_p + U\sum_{i=1}^{n} \gamma_{si} q_{iK} l_i \tag{2}$$

本文收到日期：1989年8月29日。

维普资讯 http://www.cqvip.com

式中：γ_G——恒载分项系数；Q_{GK}——恒载标准值；γ_L——活载分项系数；Q_{LK}——活载标准值；γ_P——端阻力分项系数；q_{PK}——端阻力标准值；γ_{S_i}——分层土桩侧摩阻力分项系数；q_{iK}——分层土桩侧摩阻力标准值。

本文主要探讨确定公式(2)中端阻力和桩侧摩阻力的标准值和分项系数的方法。

二、桩的设计参数估计

为了提供桩端阻力和分层土桩侧摩阻力的分项系数，要对桩端阻力和分层土桩侧摩阻力进行参数估计。最可靠的办法是在试桩时直接量测以取得这些变量的统计子样，但是这种实测资料数量很少，难以取得足够的统计数据。现实可行的办法是用经验方法将试桩所得极限承载力划分为桩端阻力和桩侧总摩阻力，然后再将桩侧总摩阻力分配给各个土层。前者已较成熟，后者比较困难。作者在文献[1]中提出一种多参数最优解法，能将桩侧总摩阻力合理地分配给各土层。用这种方法可以间接地取得统计子样，从而进行参数估计。

将桩侧摩阻力定义为静力触探比贯入阻力和土层平均埋藏深度的函数

$$q_i = F_i P_S^{\alpha} h^{\beta}$$

式中：P_S——静力触探比贯入阻力；h——土层平均埋藏深度；α，β，F_i——经验系数。

由 F_i 构成的列阵 $\boldsymbol{F}_0$ 由下式求得

$$\boldsymbol{F}_0 = \boldsymbol{S}^{-1}\boldsymbol{S}_y$$

式中：$\boldsymbol{S}^{-1}$——由 S_{ij} 构成的逆矩阵；$\boldsymbol{S}_y$——由 S_{iy} 构成的列阵。

$$S_{ij} = \sum_1^n X_i X_j, \quad S_{iy} = \sum_1^n X_i Y$$

$$X_i = l_i P_{S_i}^{\alpha} h_i^{\beta}, \quad Y = Q_f/U$$

Q_f——桩侧总摩阻力。

用上述方法统计了上海地区81根试桩资料，求得最优组合的 $\alpha=0.51$，$\beta=0.10$，并同时解得上海地区各典型土层的经验系数 F_i 值。这81根试桩资料分布于上海市各地区，全部为钢筋混凝土预制桩，大部为方桩。其中45根桩以砂性土层为桩尖持力层，28根桩以粘性土为桩尖持力层，8根桩支承于粘性土与砂性土夹(互)层上；从桩长来看，小于10m的16根，大于30m的22根，其中大于45m的有5根。这些试桩资料是在最近10多年来积累起来的，除了近年发展起来的超长桩以外，对上海地区乃至沿海软土地区具有一定的代表性。基于这些资料的统计分析结果，经过经验修正之后已经列入上海市地基基础设计规范，提供上海典型土层的极限摩阻力值。本文也以这81根试桩资料为基础，求得上海典型土层桩侧摩阻力、桩端阻力的标准值及分项系数，对我国东南沿海软土地区的桩基础设计具有实用价值。

经统计检验，从实用角度出发，桩侧摩阻力分布概率模型可假定为正态分布，桩端阻力则为对数正态分布。

桩侧摩阻力和桩端阻力的变异性取决于土的工程性质指标的变异性，也取决于土的工程性质受打桩影响的敏感程度。

桩侧摩阻力标准差 σ_S 与平均值 m_S 的散点图见图1，在暗绿色硬土层以下的晚更新世地

维普资讯 http://www.cqvip.com

层的变异系数 δ_S 多数小于 0.10，而浅层的全新世地层的变异系数在 0.10—0.20 之间，粘性土与砂性土互层或夹层的土层，其变异系数大于0.20。但从图 2 中却看到桩端阻力出现相反的现象，Q_3 老地层的变异系数 δ_P 大多在 0.25—0.40 之间，Q_4 地层的变异系数在0.10—0.25 之间。比较桩侧摩阻力与桩端阻力的变异系数，从图 3 中可以发现，桩端阻力的变异系数大于桩侧摩阻力，尤其是 Q_3 老地层更为明显。这一现象的原因可能由于晚更新世 Q_3 地层具有较强的结构性，在打桩锤击作用下，桩尖持力层结构损伤对桩端阻力变异的影响比较敏感的缘故。

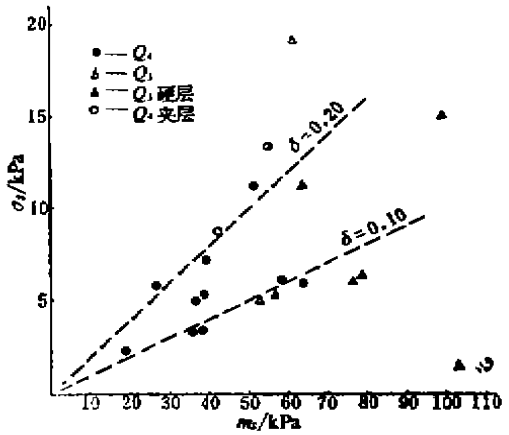


图 1　侧摩阻力标准差与平均值散点图

Fig. 1　Scatter pattern between the standard deviation and the average for skin resistance

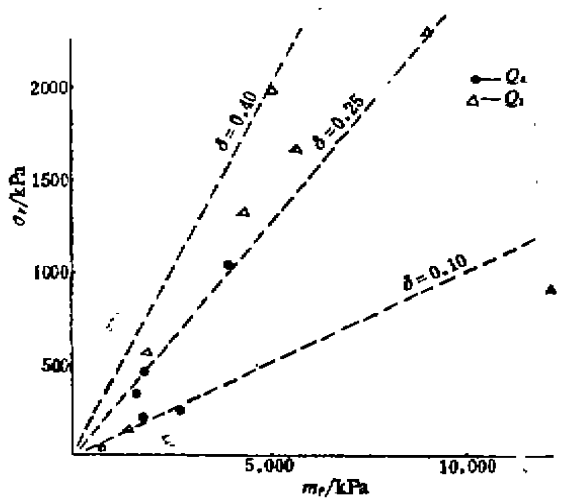


图 2　端阻力标准差与平均值散点图

Fig. 2　Scatter pattern between the standard deviation and the average for point resistance

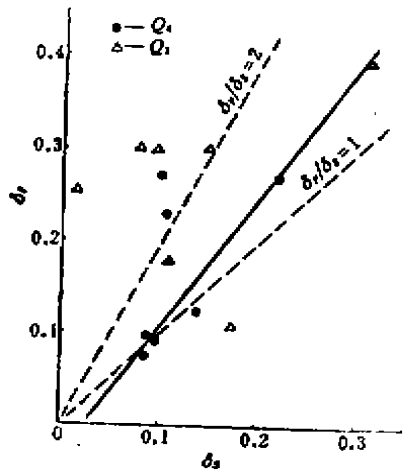


图 3　侧摩阻力与端阻力变异系数散点图

Fig. 3　Scatter pattern of variation coefficient between point resistance and skin resistance

三、对现行桩基设计方法的可靠性分析

单桩极限承载力失效模式的极限状态方程为：

$$q_P A_P + U\sum_{i=1}^{n} q_i l_i - Q_G - Q_L = 0$$

在这个极限状态方程中，如考虑几何尺寸的不确定性，则有 $2n+5$ 个基本变量，而且是非线性的。对于预制桩，桩身尺寸的不确定性可以忽略，但对灌注桩来说，桩身尺寸的不确定性

维普资讯 http://www.cqvip.com

与施工工艺、质量、土质条件等因素密切相关，其不确定性不容忽略；至于土层厚度的不确定性与土层构造特征有关，在地质、地貌条件复杂的地区，应根据地质勘察资料来估计其不确定性。如果忽略几何参数的不确定性，基本变量就降到 $n+3$ 个，而且是线性组合。如果基本变量都服从正态分布，就可很容易地求得可靠性指标 β

$$\beta=\frac{m_{QP}A_P+U\sum_{i=1}^{n}m_{Q_i}l_i-m_{QG}-m_{QL}}{\left[A_P^2\sigma_{R_P}^2+U^2\sum_{i=1}^{n}\sigma_{Q_i}^2l_i^2+\sigma_{Q_G}^2+\sigma_{Q_L}^2\right]^{\frac{1}{2}}}$$

式中：m_{QP}，m_{Qi}，m_{QG}，m_{QL} 为各相应变量的平均值；σ_{QP}，σ_{Q_i}，σ_{QG}，σ_{QL} 为各相应变量的标准差。

根据前一节参数估计的结果，并根据建筑荷载调查假定活载服从极值Ⅰ型分布，变异系数为0.29，恒载服从正态分布，变异系数为0.07。取活恒载比 $\rho=0.5$，0.2 两种情况，总安全系数取 $K=1.7$，2.0 两挡。对于桩端阻力已得出概率模型的 60 根试桩资料所代表的工况，用一次二阶矩验算点法求出可靠性指标 β 的统计情况见表1和表2。可靠性指标的平均值 m_β 与总安全系数 K、活恒载比 ρ 的关系见图4。

表 1 可靠性指标 β 的统计参数

参数	工况			
	K=1.7		K=2.0	
	$\rho=0.5$	$\rho=0.2$	$\rho=0.5$	$\rho=0.2$
m_β	3.2453	3.5566	3.7959	4.3012
σ_β	1.1797	1.0700	1.2280	1.5440
δ_β	0.3635	0.3009	0.3235	0.3590

Tab. 1 Statistical parameters of reliability index β

表 2 可靠性指标 β 的分位值与尾部概率

	K=2.0 $\rho=0.5$	K=2.0 $\rho=0.2$
$P[\beta<2.0]$	3.3%	1.7%
$P[\beta<2.5]$	11.6%	8.3%
$P[\beta<2.8]$	18.3%	18.3%
$P[\beta<3.2]$	26.6%	25.0%
$P[\beta>4.0]$	35.0%	45.0%

Tab. 2 The tail probabilities with various percentage points for reliability index β

从上述统计结果可以看出，现行设计方法的安全储备比较大，表1中最不利情况的可靠性指标平均值也大于 3.2；从表2中可靠性指标 β 分布特点可见，分布范围较宽，大 β 值出现的概率很高；从图4可以看出，即使活恒载比 $\rho=1.0$，只要总安全系数取 2.0，可靠性指标的平均值仍大于 3.2。

维普资讯 http://www.cqvip.com

四、分项系数的建议

确定分项系数的前提是选取合理的目标可靠性指标[β]，这涉及技术和经济两个方面的制约条件。表3给出了我国建筑结构设计统一标准对结构构件目标可靠性指标[β]值的建议[2]，表4是国际岩土工程标准（讨论稿）规定的目标可靠性指标[β][3]。群桩基础的受力情况并不与单个结构构件完全相同，但比较接近于延性破坏，可以参照统一标准的规定。与国际岩土工程标准相比，我们可以发现对于一级建筑物，两个标准的规定比较接近，对于其他等级，国际标准要求较高。

表3　统一标准的[β]建议值

破坏类型	安全等级		
	一级	二级	三级
延性	3.7	3.2	2.7
脆性	4.2	3.7	3.2

Tab. 3　Recommended value for [β] after the unitized standard

表4　国际岩土工程标准的[β]建议值

安全等级	一级	二级	三级
[β]	3.6	3.4	3.2

Tab. 4　Recommended value for [β] after the draft of the international geotechnical standard

综合上述两个标准的规定，我们选用目标可靠性指标[β]=3.2，取一般使用条件$K=2.0$，$\rho=0.5$，以目标可靠性指标[β]为约束条件，用一次二阶矩法求出上海地区主要代表性土层的桩端阻力、桩侧摩阻力的标准值和分项系数见表5。

表5　上海地区主要土层的设计参数

土层	q_{iK}(kPa)	γ_{Si}	q_{PK}(kPa)	γ_P
灰色粘质粉土	27	0.78		
灰色砂质粉土	38	0.88		
灰色粉砂	58	0.92	3500	0.25
灰色淤泥质粉质粘土	19	0.80		
灰色淤泥质粘土	38	0.74		
灰色粘土、粉质粘土	50	0.90		
暗绿色粘土	100	0.90	2330	0.57
草黄色砂质粉土	72	0.80	5600	0.60
青灰色粉砂	105	0.80	7700	0.52

Tab. 5　Pile foundation design parameters for typical soil layers in shanghai region

维普资讯 http://www.cqvip.com

为了比较总安全系数方法与分项系数方法的设计结果，对60根桩分别用这两种方法计算，求出每种方法的可靠性指标，画出这两种方法的可靠性指标β的直方图，从图5可以看

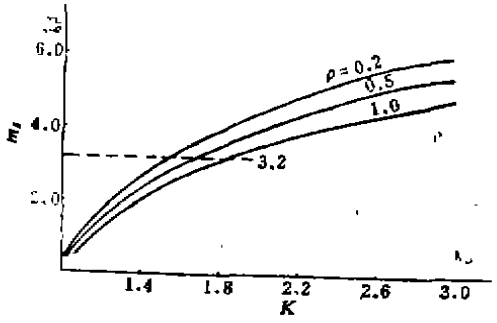


图4 m_S、K与ρ的关系

Fig. 4 The relationship between the average of reliability index safety factor and the ratio of load

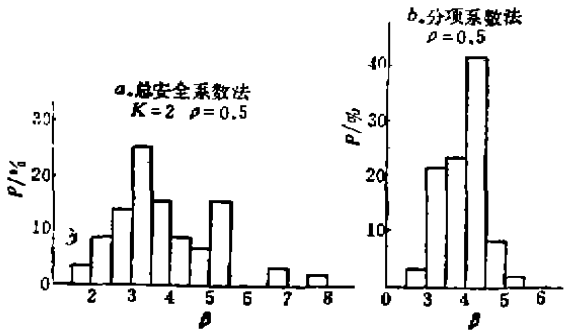


图5 可靠性指标β的直方图

Fig. 5 The histograms of the reliability index β

出，用分项系数法设计的安全度分配比较合理，β值集中在一个较小的范围内，而单一的总安全系数设计方法所得的β值很分散，不安全的或过于安全的情况出现的概率都比较大，见表6。

表6 可靠性指标分布范围对比

设计方法	β 分布范围		
	<3.0	3.0—4.5	>4.5
总安全系数法	25%	48%	27%
分项系数法	3%	87%	10%

Tab. 6 Comparison for the range of β between two design methods

五、结 论

1. 用多参数最优解法所求得的分层土桩侧摩阻力的统计参数符合一般规律，反映了地质年代与土的均匀性的影响，可以作为确定分层土桩侧摩阻力分项系数的基础数据。

2. 本文提出的桩基设计方法以及桩端阻力、桩侧摩阻力的标准值和分项系数的建议值，不仅具有与现行总安全系数设计方法相当的安全水准，而且安全度的分配更为合理，安全度过低或过高情况的出现频率均比总安全系数法低得多，这一成果可以作为编制有关规范的依据。

3. 直接量测试桩时分层土的桩侧摩阻力的方法虽然能提供更为可靠的资料，但在目前的条件下尚不能得到足够的样本容量。

维普资讯 http://www.cqvip.com

参　考　文　献

[1] 陈忠汉，高大钊．用多参数最优解法求桩侧分层土极限摩阻力．工程勘察，1988(5)：15—19．

[2] 中国建筑科学研究院主编．建筑结构设计统一标准．北京：中国建筑工业出版社，1983：5．

[3] ISO/TC 182, SC 3, Geotechnics-general part, Prepared by WG 1, 1988.

Study on Partial Factors of Pile Vertical Bearing Capacity

Gao Dazhao　Zeng Zhujia

(Department of Geotechnical Engineering)

Abstract

The pile's vertical bearing capacity is composed of point resistance and skin resistance. The skin resistance consists of frictions provided from every soil layer which the pile goes through. In general, skin frictions vary not only in quantity but also in the coefficient of variation. When the limit-state design method is used for pile foundation design, it is necessary to determine the standard value for design parameters as well as the partial factial factors for each soil layer. In this paper, an approach has been presented for determining the partial factors on the point and the skin frictions of the pile. When the pile foundation design code is drafted, the results may be treated as the basic information.

Keywords: Bearing of pile, Partial factors.